УДК 004.9

О.Ф. ДЯЧЕНКО
Мариупольский государственный университет

НЕЧЕТКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ РЫБОПРОДУКТИВНОСТИ АЗОВСКОГО МОРЯ

В статье дана оценка влияния различных факторов на динамику популяции промысловых рыб Азовского моря, уточнение их влияния на рыбопродуктивность. Применяя метод нечеткого вывода и пакет Fuzzy Logic Toolbox, можно сделать прогноз рыбопродуктивности и объемов возможных уловов.
Ключевые слова: рыбопродуктивность, теория нечетких множеств, база знаний Мамдани.

O.F. DYACHENKO
Mariupol State University, Mariupol, Ukraine

FUZZY MODEL FOR ESTIMATING FISH PRODUCTIVITY OF THE SEA OF AZOV

Abstract
In this paper the influence of different factors on population dynamics of food fish of the Sea of Azov is estimated, their influence on fish productivity is elaborated, and the method of forecast of population state and the amount of a possible catch is developed provided rational usage of food fish flocks. Modern mathematical apparatus of fuzzy set theory makes it possible to create an algorithm, i.e. an ordered sequence of mathematical and logical operations, which can be used to write a computer program of the forecast calculation of changes in the sea ecosystem in the presence of fuzzy data. Using method of fuzzy output and Fuzzy Logic toolbox, one can make the forecast of fish productivity and the amount of a possible catch, which enables an efficient usage of food fish population.
Keywords: fish productivity, fuzzy set theory, Mamdani's knowledge base.

Постановка проблемы

Азовское море является уникальным водным объектом, который соединяет в себе не только морские достоинства, но и свойства озера, а также речного лимана. Его объем составляет 320 км^3, площадь – 38 800 км^2. Максимальная глубина моря равна 14 м, а средняя глубина – всего 8 м. На протяжении тысячелетий по рыбопродуктивности оно сохраняло ведущее место среди всех водоемов мира. Его высокая рыбопродуктивность определялась масштабами воспроизводства рыбных запасов, обилием нерестилищ, низкой соленостью (10,5 %), большим притоком чистой пресной воды (41-59 км^3 в год) и высокой травянистостью мелководий.

Однако за последние полвека этот морской бассейн подвергся крайне интенсивному антропогенному воздействию. Для создания обширных орошаемых систем сооружены плотины и водохранилища, которые зарегулировали сток Дона, Кубани, Миуса и Еи. Нарастающий отбор воды на орошение, потребление на бытовые и промышленные нужды привели к существенному изменению экосистемы Азовского моря [1, 2].

Уменьшение общего годового объёма стока в море до 36,7 км^3 привело к изменению химического состава воды, увеличению концентрации соли в море и колебании солености, которая измеряется в промилле – количестве граммов солей в одном литре воды. Например, в юго-западной части моря она достигает 14 промилле, а в северо-восточной части, опресняемой водами Дона, колеблется в пределах 2-3 промилле. В настоящее время среди проблем Азовского моря задача предотвращения повышения солёности занимает первостепенное место, а ее решение позволит восстановить высокую рыбопродуктивность.

Анализ публикаций по теме исследования

Прогнозирование рыбных популяций в имитационных системах «Азовское море» и «Водохозяйственный комплекс региона», которые были разработаны в Научно-исследовательском институте механики и прикладной математики в г. Ростов-на-Дону, происходит при исследовании динамики солености, элементов кормовой базы, объема загрязнителей, температуры, биогенных стоков, ветровой ситуации, уровня отлова отдельных популяций и характеристики рыборазведения [3, 4]. В ИС анализировались 120 параметров, которые были сформированы в группы, отображающие всю совокупность процессов в экосистеме, однако сложность получения входных данных затрудняет применение данных систем.

При построении модели интегральной оценки рыбопродуктивности Азовского моря используются количественные факторы, которые обладают «размытостью», так как их точное значение очень часто оценить не представляется возможным из-за различных ограничений: сложности проведения корректных измерений; недостаточности статистических данных для достоверного описания

вероятностных характеристик и законов. В этом случае для оценки рыбопродуктивности целесообразно использовать теорию нечеткой логики.

Теории нечеткой логики посвящены работы Н. А. Аверкина, Л. С. Берштейна, Л. А. Демидовой, Л. Заде, В. П. Карелина, А. В. Леоненкова, Н. Г. Малышева, А. О. Недосекина, Д. А. Поспелова, А. П. Рыжова, С. Д. Штовбы и других. Алгоритмы нечеткого вывода предложены в работах Мамдани, Сугено, Ларсена, Цукамото.

Развитие современных информационных технологий позволяет более углубленно изучать морскую среду, открывая новые возможности для рационального освоения и использования морских ресурсов [5-7]. Современный математический аппарат теории нечетких множеств позволяет превращать в алгоритм, т.е. в упорядоченную последовательность математических и логических операций, а его в программу для компьютера, которая выдает прогнозный расчет изменений в экосистеме моря при наличии нечетких данных.

Целью статьи является оценка влияния различных факторов на динамику популяции промысловых рыб Азовского моря, уточнение их влияния на рыбопродуктивность и разработка метода прогнозирования состояния популяций и объемов возможных уловов при рациональном использовании промысловых стад.

Основная часть

При описании объектов и явлений с помощью нечетких множеств используется понятие нечеткой переменной, которая характеризуется тройкой (X, U, $R(X, u)$), где X – название переменной, U – универсальное множество (конечное или бесконечное), u – общее название элементов множества, U, $R(X, u)$ – нечеткое подмножество множества U, представляющее собой нечеткое ограничение на значения переменной u, обусловленное X.

Нечеткая переменная u является для X базовой переменной [8]. Уравнение назначения для X имеет вид $x=u : R(X)$ и отражает то, что элементу x назначается значение u с учетом ограничения $R(X)$. Ту степень, с которой удовлетворяется это равенство, будем называть совместимостью значения u с $R(X)$ и обозначать ее через $c(u)$. По определению $c(u) = \mu_{R(X)}(u), u \in U,$ где $\mu_{R(X)}(u)$ – степень принадлежности u ограничению $R(X)$.

Нечеткие множества используются для определения значений лингвистических переменных, символами которых являются слова и предложения в естественном или формальном языке, характеризующем рассматриваемое явление.

Структура лингвистической переменной описывается набором (N, T, X, G, M), в котором N – название этой переменной; T – терм-множество N, т.е. совокупность ее лингвистических значений; U – универсальное множество с базовой переменной u; G – синтаксическое правило, которое может быть задано в форме бесконтекстной грамматики, порождающей термы множества T; M – семантическое правило, которое каждому лингвистическому значению t ставит в соответствие его смысл $M(t)$, причем $M(t)$ обозначает нечеткое подмножество множества U.

В данной работе прогнозируется значение двух лингвистических переменных: продуктивность планктоноядных рыб P_p, которые питаются планктоном, и продуктивность бентосоядных рыб $P_в$, которые достают пищевые организмы с разной глубины.

Интегральную оценку продуктивности P_p планктоноядных рыб предлагается определять при помощи следующей нечеткой модели:

$$P_p = < P, S, VIW, IZW>,$$

где P – количество планктона;

S – соленость воды;

VIW – ежегодный объем притока воды в море;

IZW – индекс загрязненности воды.

Продуктивность $P_в$ бентосоядных рыб можно описать при помощи следующей нечеткой модели:

$$P_в = <B, S, VIW, IZW>,$$

где B – количество бентоса.

Лингвистические переменные P_p и $P_в$ на интервале [0-70] кг/га можно описать в виде терм-множества со значениями {Очень Малая (LE), Малая (LC), Средняя (CE), Высокая (RC), Очень Высокая (RE)} и соответствующих функций принадлежности треугольного вида, которые определяются согласно выражения:

$$\mu_{R(X)}(u)=\begin{cases}1-\dfrac{b-u}{b-a}, a\le u\le b\\ 1-\dfrac{u-b}{c-b}, b\le u\le c\\ 0, \text{в остальных случаях.}\end{cases}$$

Терм-множество лингвистической переменной «Продуктивность планктоноядных рыб», P_p приведено на рис. 1.

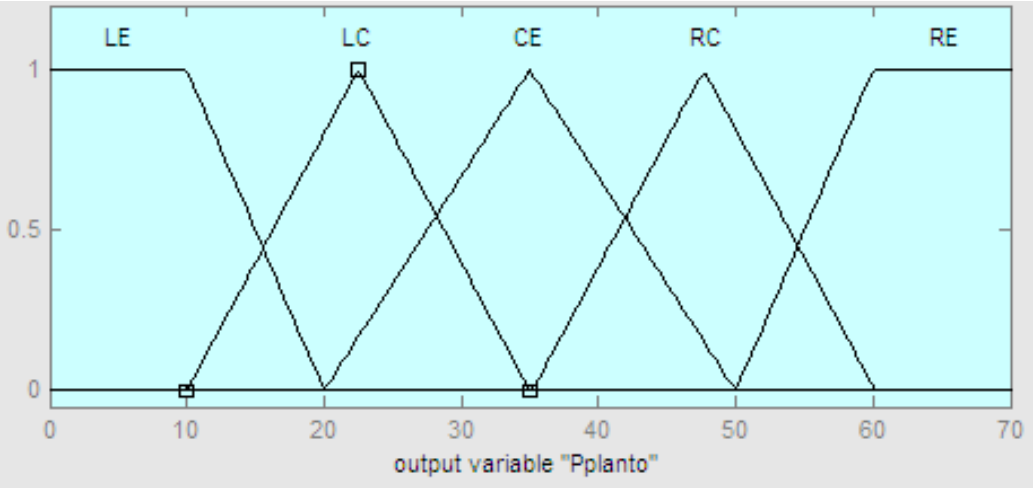


Рис. 1. Терм-множество лингвистической переменной «Продуктивность планктоноядных рыб»

При выполнении исследования принимаем максимальное количество планктона, равное 200 г/м^3, а весь интервал представляем в виде терм-множества T_p = {(Мало, L), (Средне, S), (Много, H)}.

Трехуровневая классификация лингвистической переменной «Количество планктона» приведена на рис. 2.

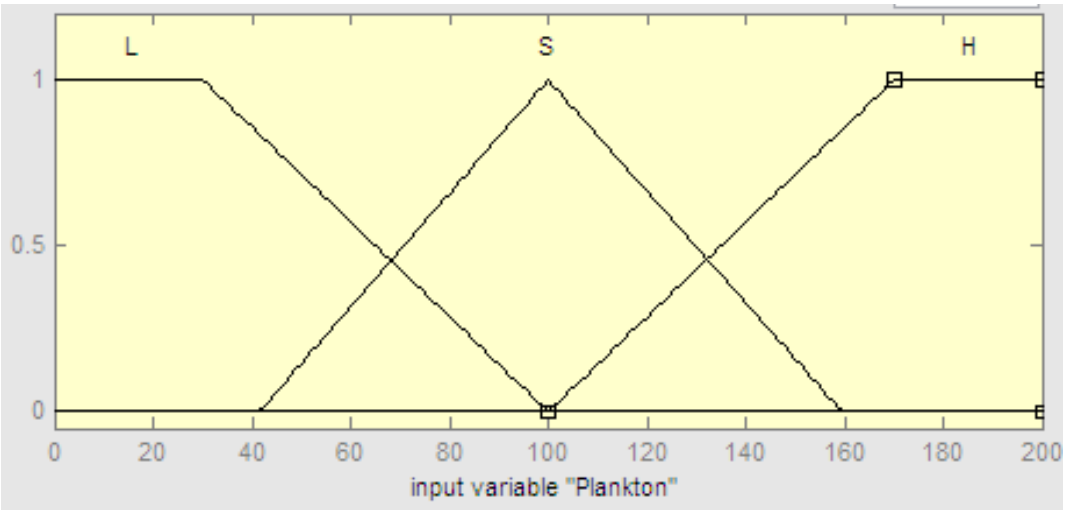


Рис. 2. Трехуровневая классификация лингвистической переменной «Количество планктона»

Максимальное количество бентоса принимаем равным 1 г/м^3, а весь интервал представляем в виде терм-множества $T_в$ = {(Мало, L), (Средне, S), (Много, H)}. Трехуровневая классификация лингвистической переменной «Количество бентоса» приведена на рис. 3.

Максимальную соленость воды принимаем равным 20 промилле, а весь интервал представляем в виде терм-множества T_s = {(Мало, L), (Средняя, S), (Высокая, H)}. Трехуровневая классификация лингвистической переменной «Соленость воды» приведена на рис. 4.

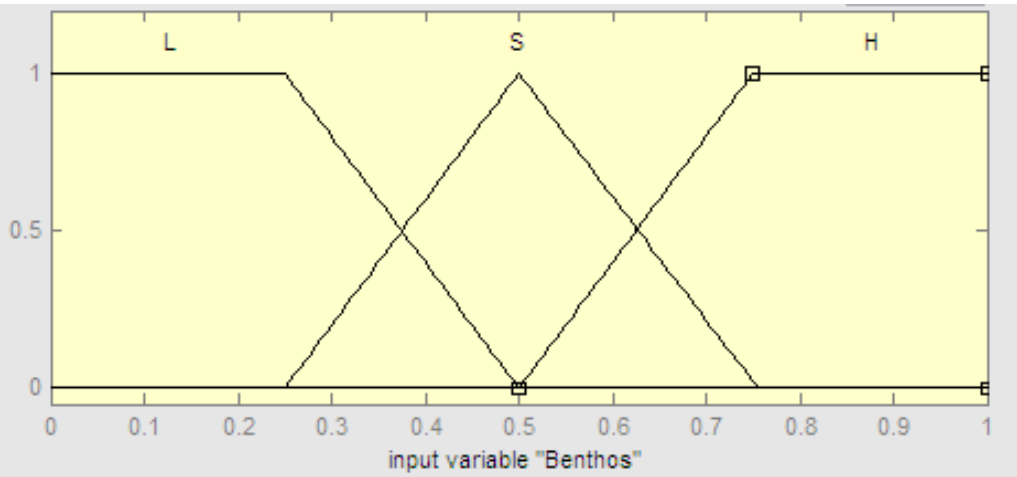


Рис. 3. Трехуровневая классификация лингвистической переменной «Количество бентоса»

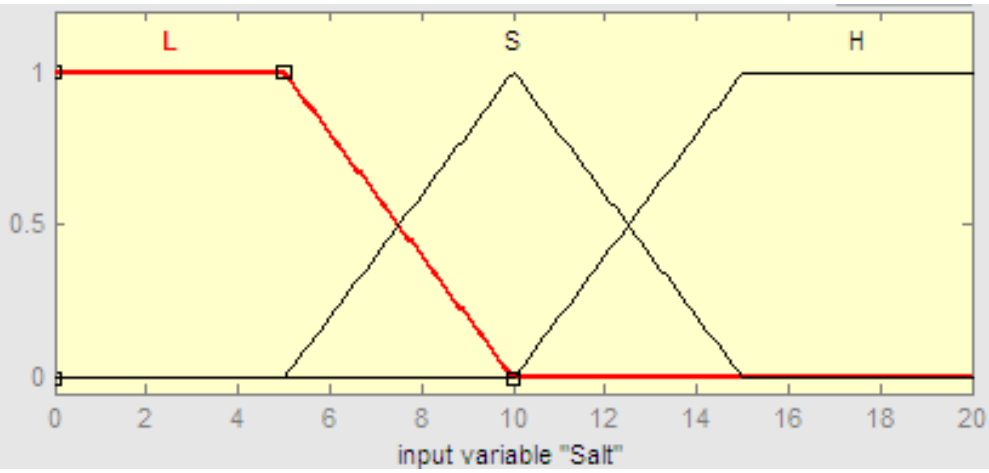


Рис. 4. Лингвистическая переменная «Соленость воды»

Ежегодный максимальный объем притока материковой воды принимаем равным 50 км^3, а весь интервал представляем в виде терм-множества T_w = {(Малый, L), (Средний, S), (Высокий, H)}. Трехуровневая классификация лингвистической переменной «Объем притока воды» приведена на рис. 5.

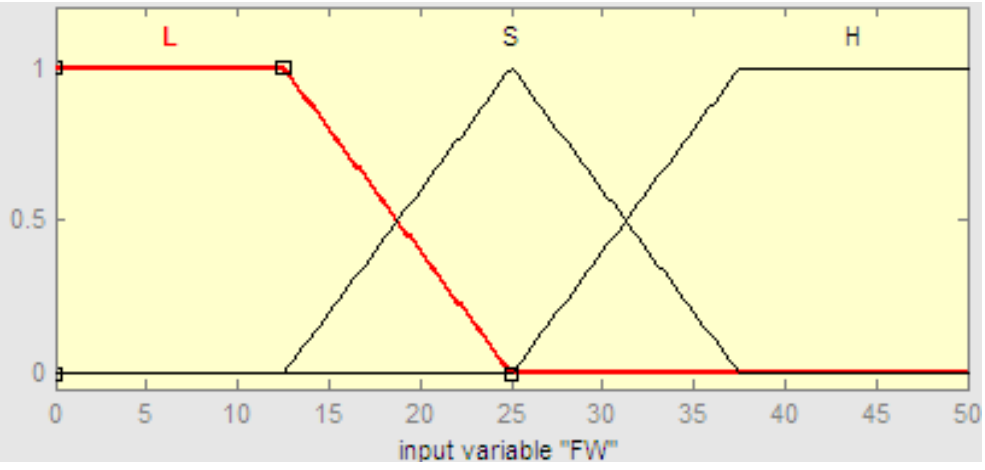


Рис. 5. Лингвистическая переменная «Объем притока воды»

Показатель *IZW* рассчитывался по формуле [9]:

$$IZW = \frac{\frac{норм O_2}{C_{O_2}} + \sum_{i=1}^{3} \frac{C_i}{ПДК_i}}{4},$$

где C_i – концентрация трех наиболее значительных загрязнителей, которая в формуле делится на допустимое по нормативам содержание.

Терм-множество лингвистической переменной «Индекс загрязнения воды» приведено на рис. 6.

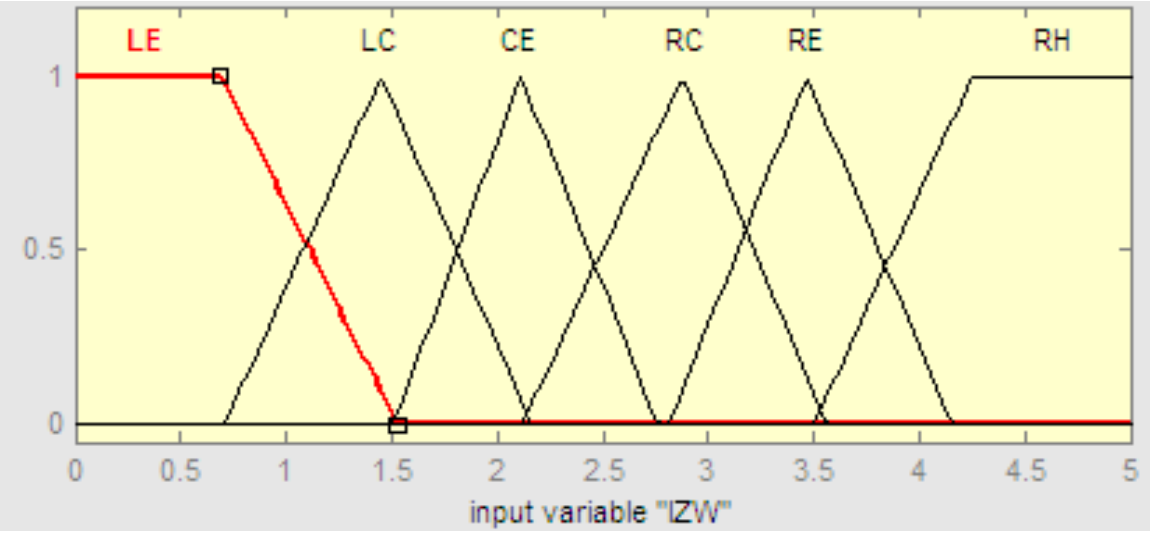


Рис. 6. Лингвистическая переменная «Индекс загрязненности воды»

Оценку рыбопродуктивности предлагается определять по алгоритму Мамдани при помощи нечеткой модели, структура которой приведена на рис. 7.

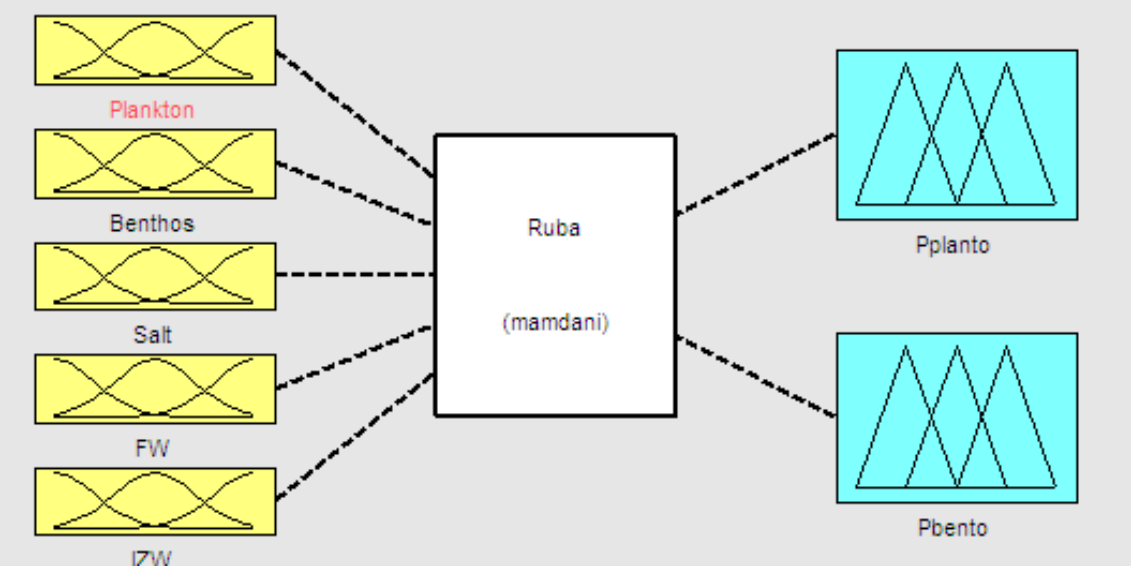


Рис. 7. Структура нечеткой модели оценки рыбопродуктивности

В данной модели используются нечеткие высказывания вида "β IS α", где: β – лингвистическая переменная; α – один из термов этой переменной.

Нечеткие высказывания применяются для построения правил нечетких продукций (далее просто правила) вида «ЕСЛИ… ТО ...», где в качестве условий и заключений используются нечеткие высказывания. Данные правила записываются в следующем виде:

IF (x_1 IS α_1) AND (x_2 IS α_2) THEN (y_3 IS d_3).

Кроме «AND», может также использоваться логическая связка «OR».

Из 26 составленных правил сформирована нечеткая база знаний Мамдани, которую можно записать следующим образом [10]:

$$\text{Если } (x_1 = \tilde{a}_{1j} \text{ и } x_2 = \tilde{a}_{2j} \text{ и...и } x_n = \tilde{a}_{nj} \text{ с весом } w_j), \text{то } y = \tilde{d}_j,\ j = \overline{1,m},$$

где $\tilde{a}_{ij}$ – нечеткий терм, которым оценивается переменная x_i в j-ом правиле, $i = \overline{1,n}$;

$\tilde{d}_j$ – нечеткое заключение j-го правила;

m – количество правил в базе знаний;

$w_j \in [0,1]$ – весовой коэффициент, отражающий адекватность j-го правила.

Базу знаний Мамдани, приведенную на рис. 8, формируем при помощи редактора правил системы нечёткого вывода Rule Editor пакета Fuzzy Logic Toolbox, который является расширением интерактивной среды MatLab [11, 12].

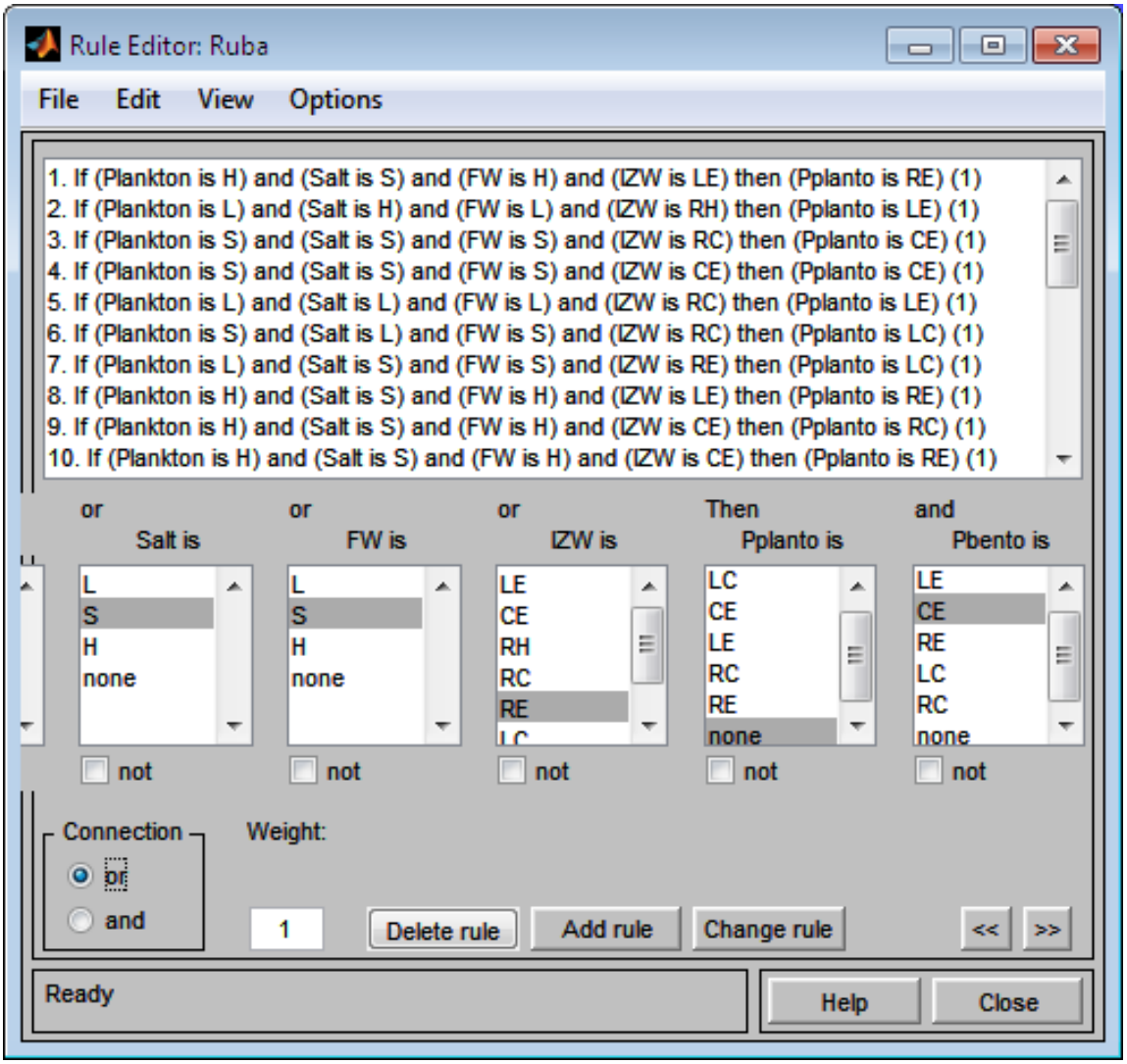


Рис. 8. База знаний Мамдани модели нечеткого вывода

Удобный графический интерфейс пакета Fuzzy Logic Toolbox позволяет в интерактивном пошаговом режиме проектировать нечеткие системы. Пример получения нечеткого вывода при помощи программы просмотра результата Rule Viewer показан на рис. 9.

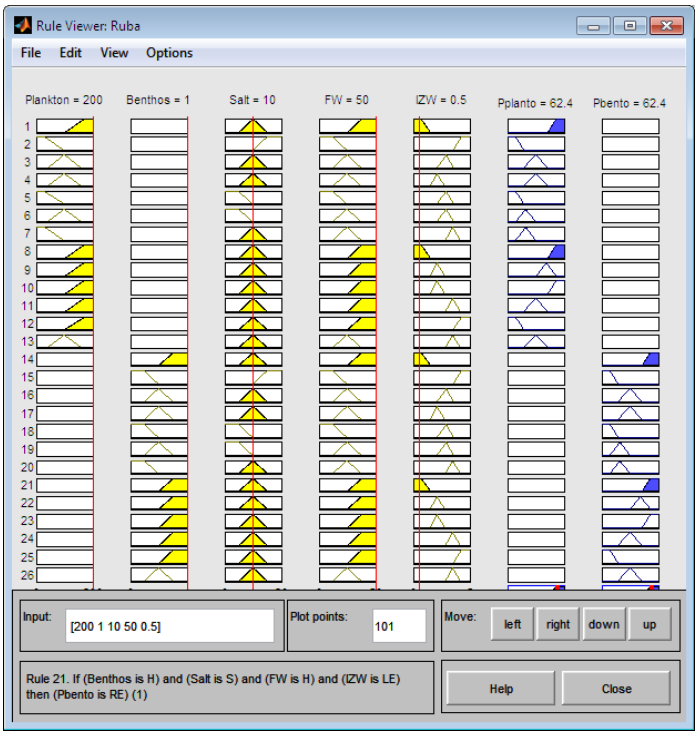


Рис. 9. Пример получения результата нечеткого вывода

График зависимости продуктивности плантофагов от индекса загрязненности воды приведен на рис. 10.

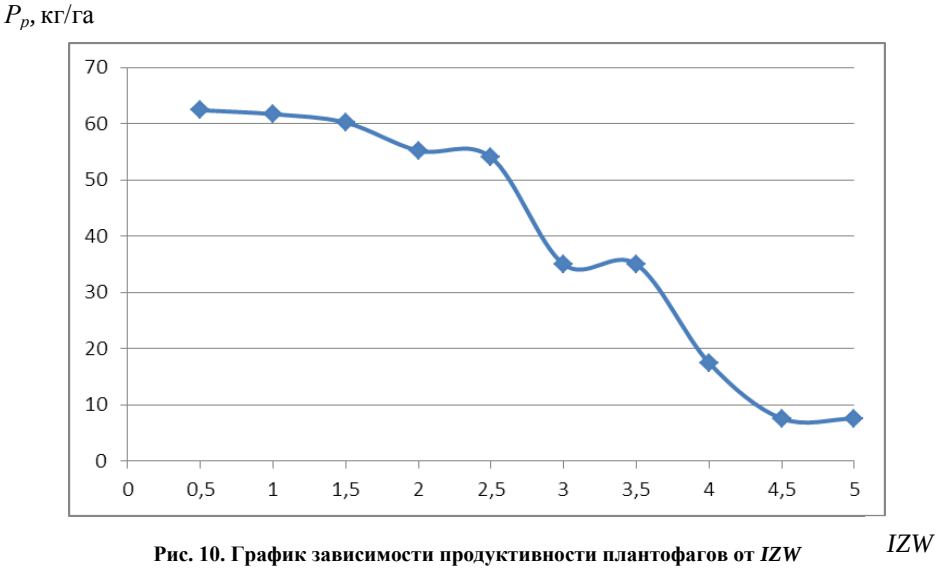


Рис. 10. График зависимости продуктивности плантофагов от *IZW*

На основании данного графика получен вывод о том, что при возрастании индекса загрязненности воды от 1 до 5 рыбопродуктивность уменьшается в 5 раз. Аналогичная зависимость получена для прогнозирования продуктивности бентофагов, при этом вместо количества планктона учитывалось количество бентоса.

Интуитивная простота нечеткой логики, как методологии разрешения проблем, гарантирует ее успешное использование для принятия решений при отсутствии точной информации о процессах в экосистеме. Нечеткая логика предлагает такой уровень мышления, благодаря которому творческий процесс моделирования происходит на наивысшем уровне абстракции, при котором постулируется лишь минимальный набор закономерностей.

Выводы и перспективы дальнейших исследований

Применяя метод нечеткого вывода, при помощи пакета Fuzzy Logic Toolbox можно сделать прогноз рыбопродуктивности и объемов возможных уловов, что позволяет рационально использовать

популяции промысловых рыб. Предложенная система поддержки принятия решений, использующая теорию нечетких множеств, отличается универсальностью и простотой, а ее применение позволяет эффективно развивать рыбную отрасль. Полученные результаты подчеркивают необходимость в разработке новых подходов к исследованию рыбохозяйственной деятельности, позволяющих более корректно выявлять факторы повышения ее продуктивности. Результаты исследования позволяют районировать акваторию Азовского моря по уровню продуктивности, что облегчает выявление наиболее перспективных районов рыбного промысла. Они становятся все более перспективными в связи с развертыванием рыболовства и интенсификацией добычи морского сырья.

Выполненные расчеты позволяет проводить количественную экологическую экспертизу любых других факторов, способных оказывать воздействие на экосистему моря. Методологические принципы, положенные в основу разработанной нечеткой модели, являются достаточно общими и могут быть использованы при моделировании других водоемов.

Литература

1. Кленкин А.А. Экосистема Азовского моря: антропогенное загрязнение. / А.А. Кленкин, И.Г. Корпакова, Л.Ф. Павленко, З.А. Темердашев. – Краснодар. Изд-во ООО «Просвещение–Юг». 2007. – 324 с.
2. Кленкин А.А. Экоаналитическая оценка состояния Азовского моря в многолетней динамике / Автореф. дисс. на соиск. уч. ст. д.х.н. – Краснодар, 2008. – 47 с.
3. Жданов Ю.А. Избранное. В 3 т. Т. 1. Ростов н/Д: Изд-во СКНЦ ВШ ЮФУ, 2009. – 400 с.
4. Горстко А.Б. Математическая модель экосистемы Азовского моря. – М.: Знание, 1979. – 64 с.
5. Горшков М.В. Экологический мониторинг. Учеб. пособие. – Владивосток: Изд-во ТГЭУ, 2010. – 313 с.
6. Сердюцкая Л.Ф. Системный анализ и математическое моделирование экологических процессов в водных экосистемах. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 144 с.
7. Принципи моделювання та прогнозування в екології / Богобоящий В.В., Курбанов К.Р., Палій П.Б., Шмандій В.М.– К.: Центр навчальної літератури, 2004. – 216 с.
8. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приблизительных решений / Л. Заде. – М.: Мир, 1976. – 165 с.
9. Коршенко А.Н. Качество морских вод по гидрохимическим показателям / А.Н. Коршенко, И.Г. Матвейчук, Т.И. Плотникова, А.В. Удовенко. // Ежегодник федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. – Обнинск: изд-во ГОИН. – 2009. – 13 с.
10. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. Леоненков. – СПб: БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.
11. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С. Штовба. – М: Горячая линия –Телеком, 2007. – 288 с.
12. Дьяконов А. П., Круглов В. В. MATLAB. Математические пакеты расширения. Специальный справочник. СПб.: Питер, 2001. – 480 с.

References

1. Klenkin A.A. Jekosistema Azovskogo morja: antropogennoe zagrjaznenie. / A.A. Klenkin, I.G. Korpakova, L.F. Pavlenko, Z.A. Temerdashev. – Krasnodar. Izd-vo OOO «Prosveshhenie–Jug». 2007. – 324 s.
2. Klenkin A.A. Jekoanaliticheskaja ocenka sostojanija Azovskogo morja v mnogoletnej dinamike /Avtoref. diss. na soisk. uch. st. d.h.n. – Krasnodar, 2008. – 47 s.
3. Zhdanov Ju.A. Izbrannoe. V 3 t. T. 1. Rostov n/D: Izd-vo SKNC VSh JuFU, 2009. – 400 s.
4. Gorstko A.B. Matematicheskaja model' jekosistemy Azovskogo morja. – M.: Znanie, 1979. – 64 s.
5. Gorshkov M.V. Jekologicheskij monitoring. Ucheb. posobie. – Vladivostok: Izd-vo TGJeU, 2010. – 313 s.
6. Serdjuckaja L.F. Sistemnyj analiz i matematicheskoe modelirovanie jekologicheskih processov v vodnyh jekosistemah. – M.: Knizhnyj dom «LIBROKOM», 2009. – 144 s.
7. Principi modeljuvannja ta prognozuvannja v ekologiї. / Bogobojashhij V.V., Kurbanov K.R., Palij P.B., Shmandij V.M.– K.: Centr navchal'noї literaturi, 2004. – 216 s.
8. Zade L.A. Ponjatie lingvisticheskoj peremennoj i ego primenenie k prinjatiju priblizitel'nyh reshenij. / L. Zade. – M.: Mir, 1976. – 165 s.
9. Korshenko A.N. Kachestvo morskih vod po gidrohimicheskim pokazateljam / A.N. Korshenko, I.G. Matvejchuk, T.I. Plotnikova, A.V. Udovenko // Ezhegodnik federal'noj sluzhby po gidrometeorologii i monitoringu okruzhajushhej sredy. – Obninsk: izd-vo GOIN. – 2009. – 13 s.
10. Leonenkov A.V. Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH / A. Leonenkov. – SPb: BHV-Peterburg, 2003. – 736 s.
11. Shtovba S.D. Proektirovanie nechetkih sistem sredstvami MATLAB / S. Shtovba. – M: Gorjachaja linija–Telekom, 2007. – 288 s.
12. D'jakonov A. P., Kruglov V. V. MATLAB. Matematicheskie pakety rasshirenija. Special'nyj spravochnik. SPb.: Piter, 2001. – 480 s.